

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ШВИДКОСТІ ВІТРУ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ РЕАНАЛІЗУ, ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

Отримано 25 вер. 2023 р. ; рекомендовано до публікації 27 вер. 2023 р.
Доступно онлайн 30 вер. 2023 р.

**К. В. Петренко¹, М. П. Кузнєцов², І. В. Іванченко³,
О. О. Кармазін⁴, А. С. Борсук⁵**

Автор для кореспонденції: Катерина Петренко,
e-mail: katerynapetrenko@gmail.com

Мета статті – проаналізувати відповідність даних швидкості вітру на метеостанціях (МС) України та відповідних до їх географічних координат, супутникових даних, представлених на порталі NASA POWER; з'ясувати можливість використання даних реаналізу для вітроенергетичних розрахунків.

Проаналізовано кореляційні зв'язки та похибки моделювання для мережі із 70 МС та відповідних до їх координат часових рядів погодинних даних швидкостей вітру бази даних реаналізу MERRA-2.

Встановлено, що використання даних реаналізу є доцільним для попередньої оцінки середньої швидкості вітру та вітроенергетичного потенціалу регіонів, середні швидкості вітру яких є вищими 3,5 м/с і які характеризуються рівнинним рельєфом та відсутністю елементів ландшафту, що здатні спотворити вітрову картину. Для таких регіонів похибка моделювання швидкості вітру становить 0,5 м/с (13,95 %), відносна похибка розрахунку середньорічного виробітку електроенергії та КВНП є рівною 17,5 %.

Дані реаналізу показують вищі значення швидкості вітру для всіх МС, крім високірних, для яких змодельовані значення є заниженими. В цілому вищим швидкостям вітру відповідають нижчі значення відносної похибки розрахунків та вищі значення коефіцієнтів кореляції середньодобових та середньомісячних значень швидкості вітру (до 0,95).

Проте використання даних реаналізу для розробки інвестиційних проєктів та прогнозування виробітку ВЕС можливе лише після попереднього калібрування та верифікації для кожного конкретного випадку.

Бібл. 35, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: вітроенергетика, дані реаналізу MERRA-2, швидкість вітру, КВНП, вітроенергетичний потенціал

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING WIND SPEED REANALYSIS DATA FOR WIND ENERGY CALCULATIONS

Received Sept. 25, 2023; accepted Sept. 27, 2023
Available online Sept. 30, 2023

**K. Petrenko¹, M. Kuznietsov², I. Ivanchenko³,
O. Karmazin⁴, A. Borsuk⁵**

Author for correspondence: Kateryna Petrenko,
e-mail: katerynapetrenko@gmail.com

The purpose of the article is to analyze the relation between wind speed data at weather stations (WS) in Ukraine and satellite data according to their geographic coordinates, presented on the NASA POWER portal; find out the possibility of using reanalysis data for wind energy calculations.

¹ головний технолог.
<https://orcid.org/0009-0004-4658-9946>

² д-р техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

³ інженер I-ї категорії.
<https://orcid.org/0000-0002-5083-4180>

⁴ канд. техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0002-7628-6880>

⁵ магістр.
<https://orcid.org/0000-0003-4092-1720>

^{1, 2, 3, 4, 5} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна.

¹ chief technologist.
<https://orcid.org/0009-0004-4658-9946>

² Dr. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

³ The 1st category engineer.
<https://orcid.org/0000-0002-5083-4180>

⁴ Cand. of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0002-7628-6880>

⁵ magister.
<https://orcid.org/0000-0003-4092-1720>

^{1, 2, 3, 4, 5} Institute of Renewable Energy National
Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Correlations and modeling errors were analyzed for a set of 70 WS and corresponding to their coordinates time series of hourly wind speed data of MERRA-2 reanalysis database.

It has been established that the use of reanalysis data is appropriate for preliminary average wind speed and wind energy potential assessment for the regions with average wind speeds higher than 3.5 m/s and characterized by a flat topography and the absence of landscape elements that can distort the wind pattern. For such regions, the error of the wind speed modeling is 0.5 m/s (13.95%), the relative error of average annual electricity production and capacity factor calculating is equal to 17.5%. The reanalysis data show higher wind speed values for all WS' except high-mountain ones, for which the simulated values are underestimated. In general, higher wind speeds correspond to lower relative error of the calculations values and higher correlation coefficients values of the average daily and average monthly wind speed values (up to 0.95).

However, the use of reanalysis data for the development of investment projects and forecasting of WPP production is possible only after preliminary calibration and verification for each specific case.

Ref. 35, tabl. 2, fig. 3.

Keywords: wind energy, MERRA-2 reanalysis data, wind speed, CF, wind energy potential

Перелік використаних позначень та скорочень

БЕС – вітроелектростанція

ВМО – Всесвітня метеорологічна організація

МС – метеорологічна станція

БЕУ – вітроелектрична установка

КВНП – коефіцієнт використання номінальної потужності

АМСЦ – авіаметеорологічна станція (цивільна)

Вступ

Оцінка вітроенергетичних ресурсів будь-якої території неодмінно починається з оцінки характеристик вітру даного регіону. Найточнішими характеристиками вітрової картини були б дані швидкості та напрямку вітру, виміряні безпосередньо на ділянці, можливість використання якої під будівництво БЕС розглядається. Проте, оскільки терміни експлуатації БЕС сягають кількох десятків років, ВМО для врахування довгострокових тенденцій рекомендує використовувати часові ряди швидкості вітру тривалістю від 10 років [1], тому такі вимірювання були б не лише дорогавартісними, а й забирали б багато часу.

Для економії часу на практиці використовують метод математичного моделювання горизонтального профілю вітру (метод МСР – “measurement-correlation-prediction”) [2], який дає можливість без значної похибки розраховувати показники довгострокового прогнозу швидкості вітру на досліджуваній ділянці, використовуючи відповідні архівні дані найближчої МС або іншого джерела довгострокових даних про швидкість і напрям вітру [3]. Проте, незважаючи на велику кількість МС в Україні, їх розподіл по території є нерівномірним [4], а результати їх вимірювань параметрів вітру не завжди є репрезентативними через постійне зростання закритості горизонту (нові будівлі, дерева тощо) тих метеомайданчиків, що розташовані в густо забудованих частинах населених пунктів. Крім того, є ряд територій, для яких інтерполяція даних спостережень МС надскладна (наприклад, офшорні території), а організація вимірювань безпосередньо на місцевості вкрай складна й дорогавартісна.

Впродовж останніх десятиліть для вітроенергетичних розрахунків часто використовують бази даних реаналізу як джерело інформації про швидкість та напрямок вітру не лише на висоті 10 м (що є стандартною для вимірювань на МС), а й на висотах 50, 100, 300 м [5–9].

Дані реаналізу є у відкритому доступі [10] та доступні для скачування в погодинному, середньодобовому та середньорічному форматі. Дискретизація здійснюється шляхом приведення до координатної сітки даних з кроком $0,5 \times 0,5^\circ$ або $1 \times 1^\circ$. Після обробки та архівування даних вони стають доступними через пакет служб POWER [11].

Проте точність даних реаналізу потребує перевірки й верифікації для кожного конкретного випадку, оскільки вони є продуктом складного моделювання, для якого використовуються супутникові дані та дані дистанційного зондування [12].

Розробники рекомендують використовувати параметри швидкості та напрямку вітру для визначення середніх характеристик вітрового потоку регіону, а не локальної території через вплив будівель і місцевої орографії [13].

Оскільки існують території й акваторії, для яких відсутні дані наземних вимірювань, розрахунки вітроенергетичного потенціалу для них можливі лише на основі даних реаналізу.

Верифікація даних реаналізу для конкретних територій та оцінка їх достовірності – одна з ключових задач, яку вирішують дослідники різних країн у сфері вітроенергетики [14–23].

Таким чином, надзвичайно важливо з'ясувати відповідність даних реаналізу до реальних даних метеорологічних спостережень на території України для обґрунтування можливості їх використання для оцінки вітроенергетичних ресурсів територій, для яких відсутні дані наземних спостережень.

Метою цієї роботи є оцінка зв'язку між даними швидкості вітру на МС і даними реаналізу та з'ясування умов доцільності використання даних реаналізу для оцінки вітроенергетичних характеристик регіону.

Актуальність дослідження

Національне управління з авіації та дослідження космічного простору Сполучених Штатів розробило набір даних глобального реаналізу під назвою «Ретроспективний аналіз сучасної ери для досліджень і застосувань, версія 2» (MERRA-2). MERRA-2 виконує реаналіз, використовуючи дані з 1980 року до теперішнього часу, та надає значення для ряду метеорологічних параметрів [24]. Також було проведено дослідження, щоб оцінити точність прогнозів вітру MERRA-2. Мамані та ін. [25] порівняли MERRA-2 з місцевими даними та числовою моделлю прогнозу погоди в Болівії та виявили значні розбіжності, потенційно через велику абсолютну висоту над рівнем моря розглянутих місць. Дослідження в Пакистані показало схожі результати, а також постало питання про відсутність регіональних даних, доступних для використання в реаналізі MERRA-2 [26]. Більш широке дослідження точності MERRA-2 було проведено в [27], де розглянуто різноманітні місця по всьому світу, включаючи Швейцарію, Австралію (Брісбен), США, Чилі, Німеччину, Іран та офшорні локації в Данії та Японії. Вони порівняли середню швидкість вітру від MERRA-2 з даними від Meteoronorm, який збирає інформацію з метеостанцій у всьому світі, й виявили, що загалом кореляції є досить високими. Особливий інтерес для цього дослідження являють висновки про те, що Брісбен мав найнижчий коефіцієнт кореляції (0,81), тоді як кореляції для офшорних локацій були досить високими, 0,99 і 0,88 для Данії та Японії відповідно [27]. Це свідчить про те, що MERRA-2 може бути корисним для дослідження офшорних потенціалів виробітку електричної енергії; однак дослідження було обмеженим, оскільки воно не враховувало сезонних і добових часових коливань, натомість розглядало лише середню швидкість вітру. Автори дослідження [28] порівняли дані MERRA-2 з даними метеорологічних станцій в Європі з результатами реаналізу MERRA-2 і з'ясували, що незважаючи на те, що MERRA-2 добре враховує часові варіації швидкості вітру в середньомісячних і сезонних трендах, фактичні оцінені швидкості відхиляються від спостережень, і ступінь цих розбіжностей змінюється залежно від географічних умов оточуючої місцевості. Дослідження також демонструє значущість дисперсій обчислених коефіцієнтів використання номінальної потужності ВЕУ (на 30 % недооцінено КВНП у Середземномор'ї та на 60 % переоцінено для північного заходу Європи [28]. Однак дослідники відзначають, що прогнози MERRA-2 щодо офшорних швидкостей вітру та КВНП ВЕУ видаються більш точними, ніж для суходолу.

У роботі [29] проведено оцінку придатності супутникових даних для розрахунку офшорного вітроенергетичного потенціалу на основі зіставлення даних реаналізу з наземними спостереженнями. Дослідники дійшли висновку, що дані реаналізу показують тенденцію до завищення значень швидкості вітру для МС з низькими швидкостями вітру (< 4 м/с) та дещо занижують значення для територій з сильними вітрами (> 7 м/с). Середня відносна похибка даних реаналізу становила 32,7 % відповідно до результатів дослідження [29].

Дослідження зв'язку між даними реаналізу та даними МС було проведено для території Мексики [18]. Вчені виявили, що зі збільшенням ступеня агрегованості даних (від погодинних до середньомісячних і середньорічних) коефіцієнт кореляції зростає. Крім того, дослідниками вказано на труднощі в представленні вітрової картини за допомогою даних реаналізу для складних і пересічених форм рельєфу (середній коефіцієнт кореляції для таких локацій становить 0,38). Проте для регіонів, де вітрові потоки визначаються не місцевою циркуляцією, яку спричинює орографія місцевості, а великомасштабною циркуляцією, що взаємодіє з масштабною орографією, коефіцієнти кореляції є значно вищими (середній – 0,84).

Розрахунки КВНП ВЕУ [18] на основі даних реаналізу також мають тенденцію до завищення значень.

Оскільки оцінка доцільності використання даних реаналізу для вітроенергетичних розрахунків, яка проводиться групами вчених різних країн, показує неоднозначні результати, важливо проаналізувати придатність цих даних для використання в обчисленні вітроенергетичних показників для території України.

Матеріали та методи

Для порівняння швидкості вітру, виміряної на МС України, з відповідними до їх координат даними реаналізу, було сформовано базу даних опорних МС, до якої увійшли МС, що відповідають таким вимогам:

- наявність неперервного ряду спостережень за період 2011–2020 рр.;
- відсутність значних перешкод (елементів рельєфу, будівель, дерев тощо), які б могли спричинити спотворення вітрової картини через закритість горизонту на певних румбах;
- використання одного типу вітровимірювального приладу впродовж вказаного періоду.

Згідно з вищеперерахованими вимогами до мережі опорних МС увійшли МС, що їм відповідають, та декілька станцій, які розташовані поруч з державним кордоном України (чи береговою лінією) і слугують «крайніми точками» для коректнішого просторового представлення метеорологічної інформації [30]. У результаті було сформовано перелік із 70 МС, дані яких є репрезентативними для регіонів, в яких вони розташовані.

Відповідно до географічних координат опорних МС було створено базу даних реаналізу (погодинних даних швидкості вітру на висоті 10 м) [10]. Метеорологічні параметри, представлені на порталі *NASA POWER*, отримані з моделі асиміляції GMAO MERRA-2 HACA та GEOS 5.12.4 FP-IT. MERRA-2 є версією системи асиміляції даних NASA Goddard Earth Observing System (GEOS) [31] GEOS версії 5.12.4 має таку саму роздільну здатність сітки, що й MERRA-2 (і ту саму фізику моделі) [32].

Формування рядів даних для порівняння було здійснено з тригодинним кроком, відповідно до строків спостережень, за якими здійснюється вимірювання параметрів на МС.

Оцінка зв'язку між даними реаналізу та даними МС здійснювалася методом порівняння статистичних пара-

метрів рядів (середнє значення, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт варіації), а також визначенням коефіцієнтів кореляції, які дають можливість оцінити ступінь зв'язку між двома або більше випадковими величинами [33]. Ці параметри були розраховані для 70 пар рядів даних.

Подальший аналіз здійснювався шляхом побудови дендрограми результатів кластерного аналізу за такими показниками рядів:

- різниця середніх швидкостей за період 2011–2020 рр.;
- коефіцієнт кореляції між рядами.

Кластерний аналіз було проведено з використанням статистичної програми PAST, що являє собою безкоштовний пакет програм для аналізу статистичних даних [34].

Для формування кластерів було застосовано метод Уорда, який дає змогу мінімізувати внутрішньогрупову дисперсію всередині кластерів. Згідно з цим методом приєднання об'єктів до кластерів здійснюється в разі мінімального приросту внутрішньогрупової суми квадратів відхилень. При визначенні міри подібності об'єктів кластерного аналізу використовуються чотири види коефіцієнтів: коефіцієнти кореляції, показники відстаней, коефіцієнти асоціативності, коефіцієнти подібності. Кожен з цих показників має свої переваги та недоліки, які попередньо потрібно врахувати [35].

У кожному з отриманих кластерів було вибрано МС для побудови регресійної моделі, яка б дала можливість передбачати значення однієї випадкової величини за

конкретними значеннями іншої [33]. Для вибраних МС і відповідних до них рядів даних реаналізу були розраховані такі показники:

- середня швидкість вітру, м/с;
- частка енергетичної швидкості, %;
- середньорічний виробіток електричної енергії, кВт*год;
- КВНП ВЕУ;
- вітроенергетичний потенціал на висоті 10 м; Вт/м².

Для розрахунків було використано криву потужності типової ВЕУ тримегаватного класу.

Результати дослідження

На першому етапі дослідження було сформовано базу даних метеорологічних спостережень за швидкістю вітру, до якої увійшли дані 70 МС та відповідних до їх координат рядів даних реаналізу MERRA-2. Було розраховано коефіцієнти кореляції для кожної пари рядів. Середній коефіцієнт кореляції для середньодобових даних становить 0,8 (мінімальний 0,45 для МС Ай-Петрі, максимальний 0,92 для АМСЦ Кривий Ріг). Середній коефіцієнт кореляції для середньомісячних значень швидкості вітру становить також 0,8 (мінімальний 0,35 для МС Ай-Петрі, максимальний 0,95 для АМСЦ Рівне). Середній коефіцієнт кореляції для середньорічних значень швидкості вітру становить 0,59 (мінімальний 0,12 для МС Біловодськ, максимальний 0,9 для АМСЦ Рівне). Результати кореляційного аналізу для середньомісячних даних представлені на рис. 1.

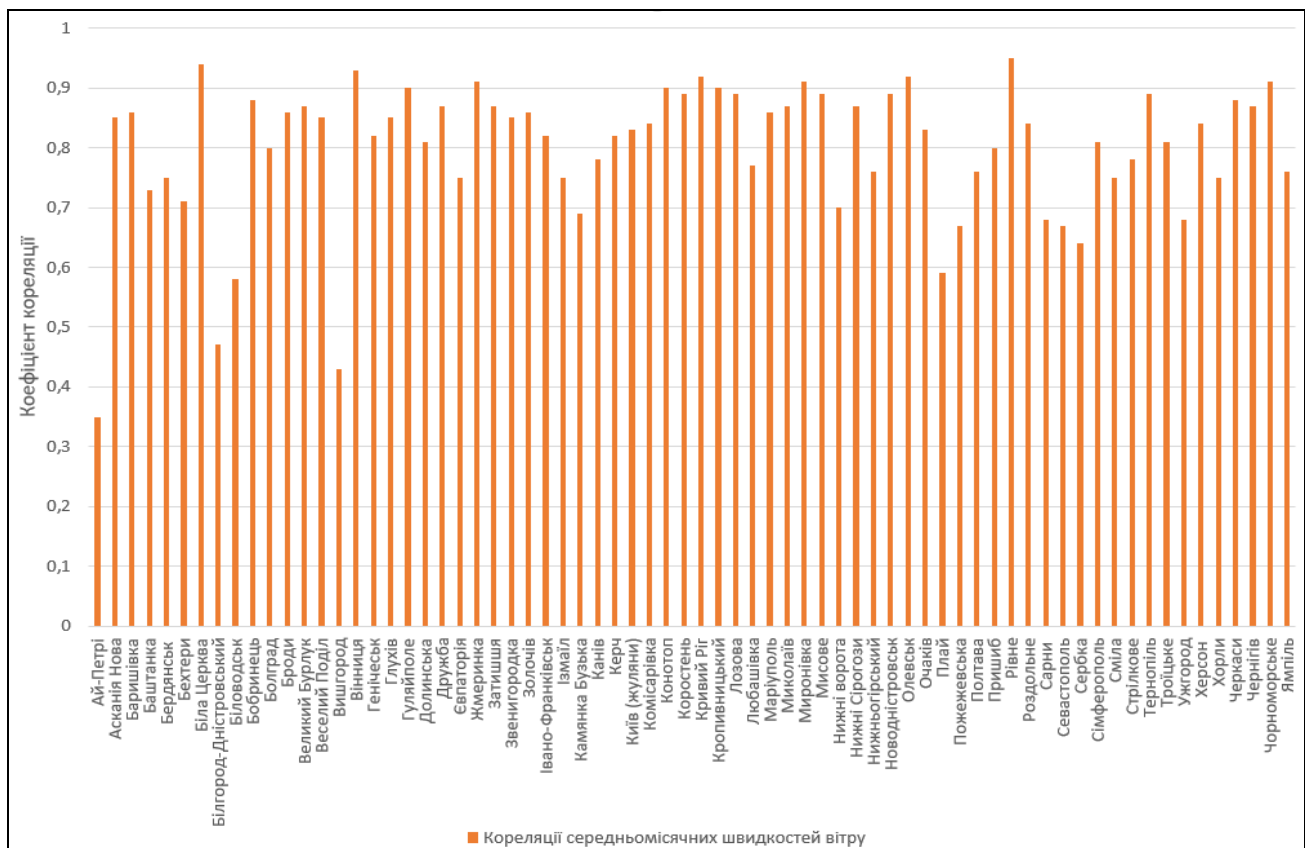


Рис. 1. Коефіцієнти кореляції середньомісячних даних швидкості вітру на МС та даних реаналізу

Fig. 1. Correlation of average weather stations' wind speed data and reanalysis data

З метою виявлення закономірностей, які визначають наявність тісного кореляційного зв'язку між даними, використовуючи коефіцієнти кореляції між середньомісячними рядами даних та різницею середніх швидкостей між виміряними та змодельованими

даними, було проведено кластерний аналіз МС. Для формування кластерів було застосовано метод Уорда [35].

Було отримано п'ять кластерів (рис. 2). Середні статистичні параметри для кожного з кластерів представлено в табл. 1.

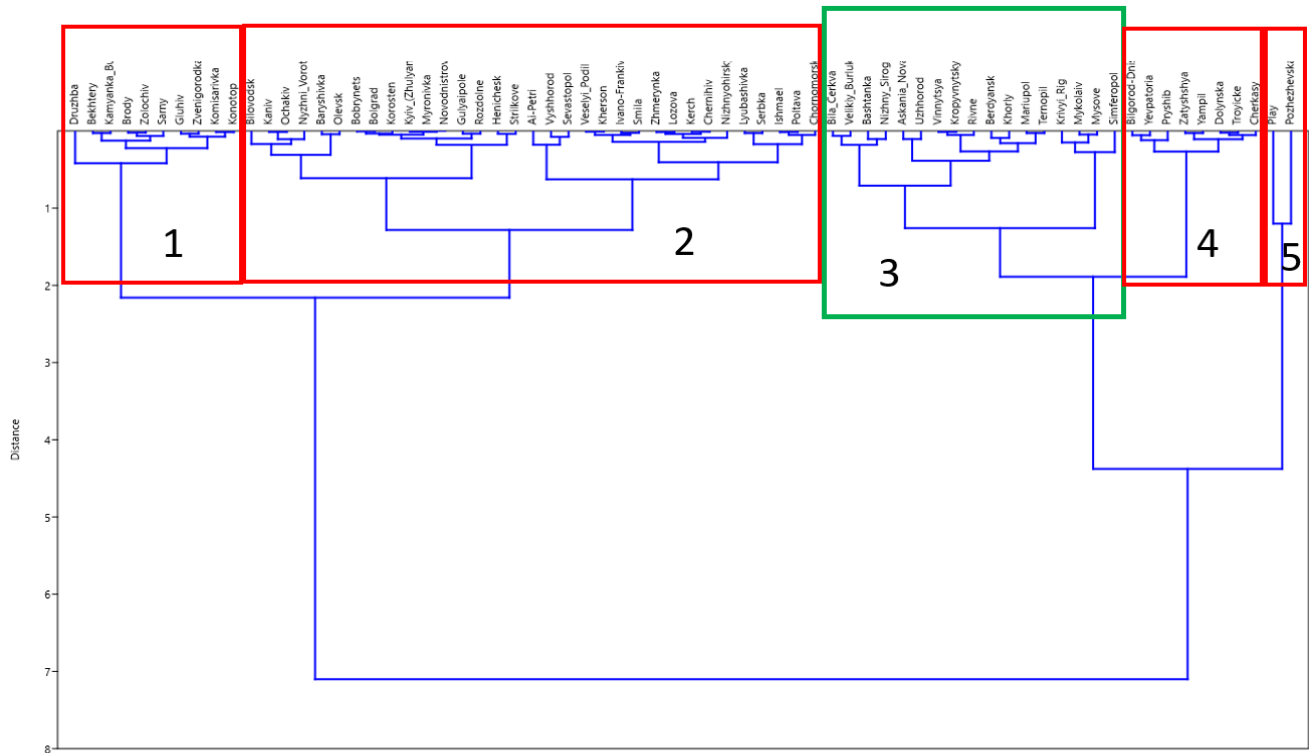


Рис. 2. Результати кластерного аналізу МС України

Fig. 2. Cluster analysis results for WS of Ukraine

Таблиця 1. Статистичні параметри кластерів

Table 1. Statistical parameters of clusters

Номер кластера	1	2	3	4	5
Кількість МС в кластері	10	33	17	8	2
Середня швидкість вітру за даними МС, м/с	2,20	2,83	3,87	3,43	4,20
Середня швидкість вітру за даними реаналізу, м/с	4,45	4,48	4,40	4,57	2,17
Різниця ($V_{\text{реан.}} - V_{\text{МС}}$), м/с	2,25	1,65	0,53	1,14	-2,03
Відносна похибка, %	102,27	58,30	13,95	32,94	-48,33
Коефіцієнт кореляції	0,82	0,79	0,84	0,79	0,60
Серед. град. закритості МС	6,48	5,11	3,96	3,10	4,90

Оскільки метою кластеризації було виокремлення груп МС з мінімальною внутрішньогруповою дисперсією всередині групи, а не рівномірний розподіл МС по кластерах, то кількість об'єктів усередині кожного кластера суттєво відрізняється. Проте, як видно з табл. 1, між кластерами існують суттєві відмінності за статистичними параметрами. Найзначиміші відносні похибки швидкостей вітру характерні для першого і п'ятого кластерів. У першому кластері реальні швидкості вітру вдвічі нижчі, а в п'ятому – вдвічі вищі, ніж швидкості вітру за даними реаналізу. Найкращий коефіцієнт кореляції даних та найменша різниця швидкостей (ознаки, за якими проводився

кластерний аналіз) характерні для третього кластера (коефіцієнт кореляції 0,84, $V_{\text{реан.}} - V_{\text{МС}} = 0,53$ м/с, що становить менше 14 % похибки). Коефіцієнт кореляції даних є також найвищим для третього кластера.

З метою виявлення фактора, який міг би пояснити такий розподіл, було проаналізовано інформацію про затінення МС (середній градус закритості), оскільки оточуючий ландшафт може суттєво спотворювати вітрову картину місцевості. З'ясувалося, що середній градус закритості горизонту є найнижчим для четвертого і третього кластерів (3,10° та 3,96° відповідно) та найвищим для першого кластера (6,48°). До третього кластера

ввійшла абсолютна більшість АМСЦ України, які розміщуються в аеропортах.

Наступним етапом дослідження було картографічне представлення результатів кластерного аналізу (рис. 3).

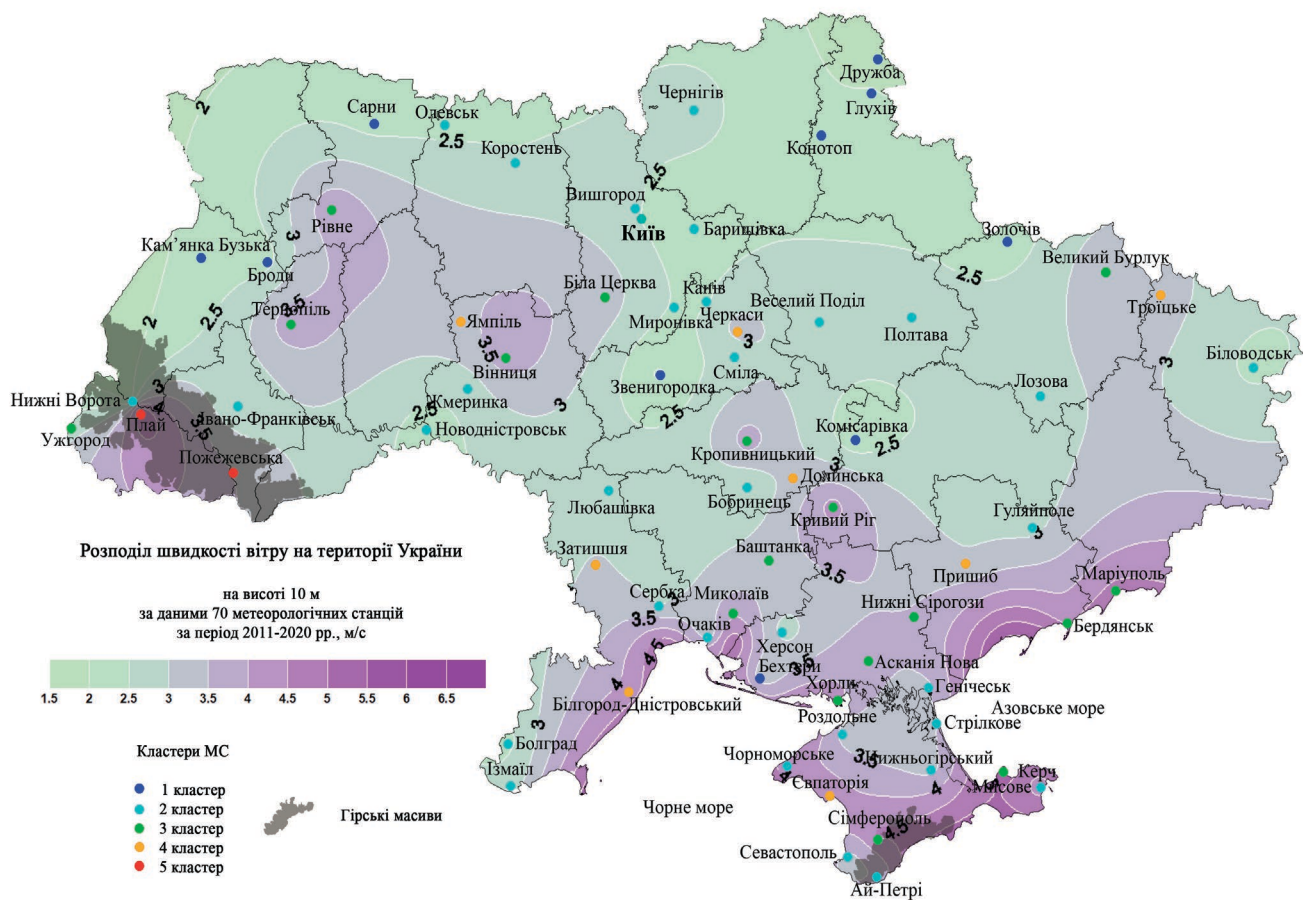


Рис. 3. Результати кластеризації МС України на карті просторового розподілу середньої швидкості вітру

Fig. 3. The WS' of Ukraine clustering results on the map of the wind speed spatial distribution

Аналіз рис. 3 показав, що:

- МС п'ятого кластера розташовані в гірських районах, для яких дані реаналізу не є репрезентативними взагалі, оскільки орієнтація хребтів і долин позбавляє сенсу будь-яку інтерполяцію результатів вимірювань, а тим більше – моделювання, з відстанню між вузлами сітки в 50 км;
- Об'єкти другого кластера переважно розташовані на територіях з середніми швидкостями вітру від 2,5 до 3,0 м/с;
- Об'єкти третього та четвертого кластерів, для яких значення похибок є найнижчими, усі розташовані на територіях, для яких середня швидкість вітру перевищує 3 м/с;

До третього кластера увійшли 8 АМСЦ, які розміщені в аеропортах, які завідомо розташовані на рівнинних і відкритих територіях, що робить умови вимірювання параметрів вітру на них мінімально спотвореними орографічними перешкодами, високою рослинністю та забудовою, і тому максимально точними.

Наступним етапом дослідження була спроба оцінити точність оцінки вітроенергетичних параметрів для об'єктів з кожного кластера.

Для цього було вибрано п'ять МС з середніми показниками швидкості вітру та коефіцієнтів кореляції, притаманними кожному з кластерів. Перший кластер – МС Золочів, другий – МС Стрілкове, третій – АМСЦ Кропивницький, четвертий – МС Ямпіль, п'ятий – МС Плай. Для вибраних МС було побудовано регресійні моделі та вказано величини достовірності апроксимації (рис. 4).

Як видно з регресійних моделей, найменше значення коефіцієнта b в рівнянні лінії регресії $y = ax + b$ спостерігається для пар значень швидкості вітру на МС третього кластера (0,78). Також для цього кластера характерний найменший розкид значень відносно лінії регресії ($R^2 = 0,8$). Це свідчить про найтісніший зв'язок між даними МС та реаналізу для МС третього кластера в межах цієї вибірки об'єктів дослідження.

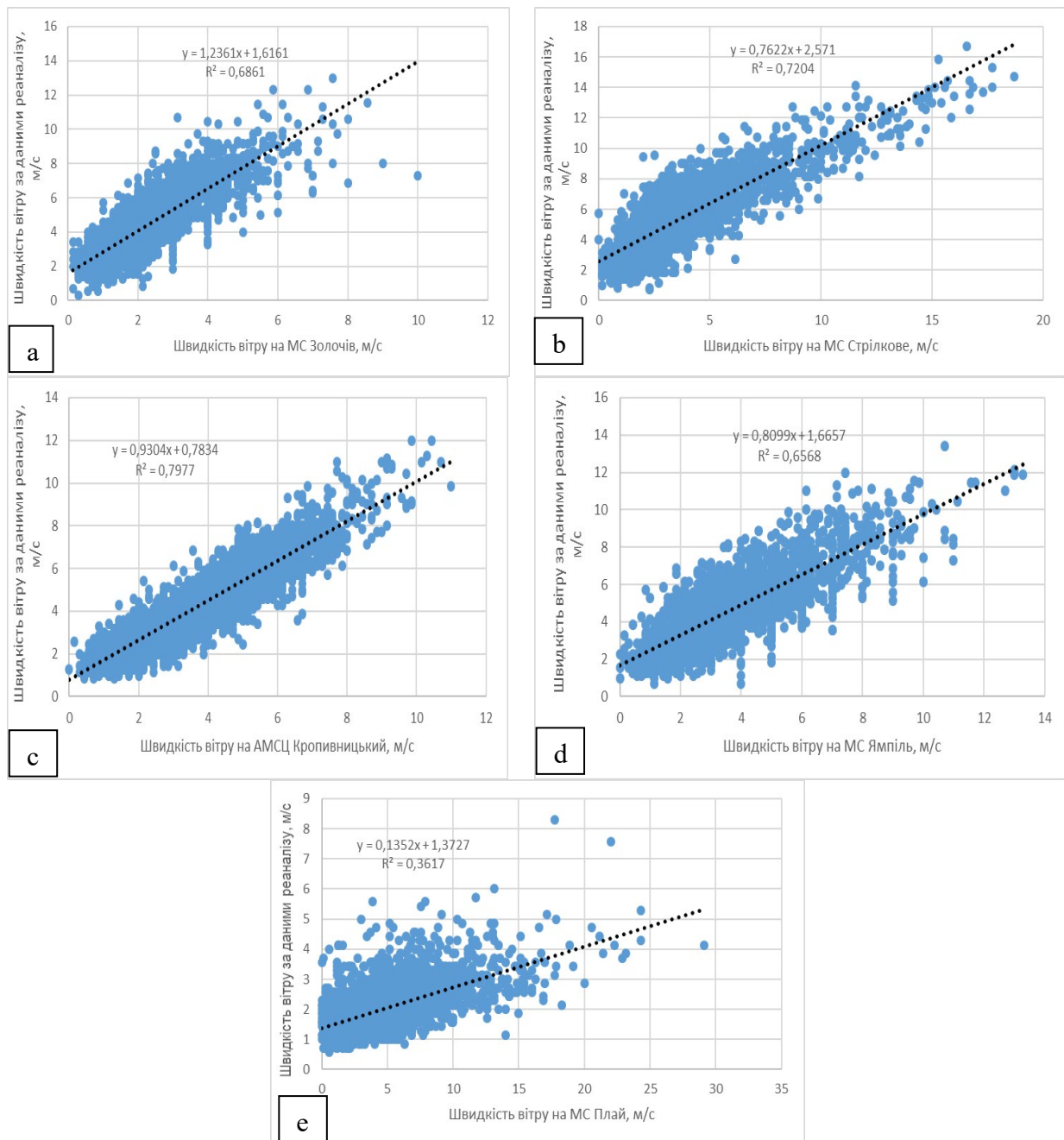


Рис. 4. Діаграма розсіювання виміряної та змодельованої швидкостей вітру для 5 МС: а – МС Золочів; б – МС Стрілкове; с – АМСЦ Кропивницький; д – МС Ямпіль; е – МС Плай

Fig. 4. Scatter diagram of measured and simulated wind speeds for 5 WS: а – WS Zolochiv; б – WS Strelkove; с – AWSC Kropyvnytskyi; д – WS Yampil; е – WS Play

Для з'ясування впливу похибок в оцінці швидкості вітру на основні енергетичні показники, було вибрано криву потужності віртуальної ВЕУ тримегаватного класу з

висотою осі ротора 120 м.

Результати розрахунків наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Порівняння основних енергетичних параметрів вітрового режиму за даними МС та даними реаналізу
Table 2. Comparison of the main energy parameters of the wind regime according to WS data and reanalysis data

Показник	МС Золочів	МС Стрілкове	АМСЦ Кропивницький	МС Ямпіль	МС Плай
Середня швидкість вітру на МС, м/с	2,21	3,49	3,77	3,36	4,91
Середня швидкість вітру за даними реаналізу, м/с	4,4	5,29	4,29	4,47	2,03
Різниця середніх швидкостей вітру, $(V_{\text{реан.}} - V_{\text{МС}})$, м/с	2,19	1,80	0,52	1,11	-2,88

Продовження Таблиці 2

Continuation of Table 2

Показник	МС Золочів	МС Стрілкове	АМСЦ Кропив- ницький	МС Ям- піль	МС Плай
Похибка середніх швидкостей вітру відносно даних МС, %	99,10	51,58	13,79	33,04	-58,66
Середньорічний виробіток електроенергії на площадці МС, МВт*год	3 154	6 574	9 308	7 161	11 939
Середньорічний виробіток електроенергії за даними реаналізу, МВт*год	11 900	14 010	10 939	11 622	2 019
Різниця середньорічного виробітку, кВт*год	8 746	7 435	1 631	4 460	-9 920
Відносна похибка середньорічного виробітку, %	277,30	113,09	17,52	62,28	-83,09
КВНП ВЕУ за даними МС	0,12	0,25	0,35	0,27	0,45
КВНП ВЕУ за даними реаналізу	0,45	0,53	0,42	0,44	0,08
Різниця КВНП ВЕУ	0,33	0,28	0,06	0,17	-0,38
Відносна похибка КВНП ВЕУ, %	277,50	113,20	17,51	62,50	-83,04
Вітропотенціал на висоті 10 м за даними МС, Вт/м ²	19,22	113,95	70,45	63,29	291,25
Вітропотенціал на висоті 10 м за даними реаналізу, Вт/м ²	93,78	166,5	86,70	100,46	9,11
Різниця потенціалів, Вт/м ²	74,56	52,52	16,25	37,17	-282,14
Відносна похибка розрахованих значень вітропотенціалів, %	387,82	46,10	23,06	58,74	-96,87

Як видно з табл. 2, в першому кластері (МС Золочів) середні швидкості вітру за даними реаналізу є завищеними по відношенню до даних спостережень на МС вдвічі, що призводить до завищених значень середньорічного виробітку електроенергії та КВНП ВЕУ (в 3,8 раза).

У другому кластері (МС Стрілкове), де середні швидкості вітру трохи вищі (різниця становить 1,8 м/с), значення середньорічного виробітку електроенергії та КВНП ВЕУ за даними реаналізу перевищують розрахунки за даними МС в 2,1 раза.

У третьому кластері (АМСЦ Кропивницький), різниця середніх швидкостей в 0,5 м/с призводить до похибки в оцінці КВНП ВЕУ та середньорічного виробітку електроенергії на рівні 17,5 %.

У четвертому кластері (МС Ямпіль) різниця середніх швидкостей вітру становить 1,11 м/с, що спричинює похибку в розрахунках КВНП ВЕУ та середньорічного виробітку електроенергії на рівні 62,3 %.

П'ятий кластер, до якого увійшли гірські метеостанції Українських Карпат, представлений МС Плай. Середні швидкості вітру за даними реаналізу є суттєво нижчими в порівнянні з даними спостережень. Середня швидкість вітру занижена більш ніж вдвічі. Відповідно суттєво заниженими є і значення виробітку електроенергії та КВНП ВЕУ. Проте розробники бази даних MERRA-2 попереджають про некоректність використання їх продукту для місцевостей зі складною орографією, тому такі суттєві похибки в цьому кластері є цілком очікуваними.

У розрахунках вітроенергетичного потенціалу найменшу похибку обчислення виявлено для МС третього кластера (23 %).

Варто зазначити, що отримані результати не суперечать результатам, отриманим іншими дослідниками. Відносна похибка швидкості вітру за супутниковими даними для вибраних локацій в Австралії сягала 113,7 % і набувала

максимальних значень для локацій з низькою (< 4 м/с) та високою (> 7 м/с) швидкостями вітру. Середня відносна похибка швидкості вітру для всіх пунктів спостережень становила 32,7 % [29].

У матеріалах дослідження [28] було показано, що використання некорегованих даних реаналізу для оцінки КВНП ВЕУ призвело до недооцінки значень КВНП ВЕУ на 30 % (Португалія, Румунія) та переоцінки на 60 % (Німеччина, Данія).

Висновки. Коректне визначення вітроенергетичного потенціалу території має базуватися на максимально точних даних вимірювань швидкості вітру впродовж тривалого проміжку часу. Оскільки покриття території України джерелами даних про вітер є вкрай нерівномірним, а на офшорних територіях відсутнє взагалі, постає актуальним питання пошуку альтернативних джерел даних про вітрову картину регіону.

У дослідженні параметрів розподілу швидкості та напрямку вітру, а також для оцінки вітроенергетичних параметрів різних країн та регіонів учені всього світу дедалі частіше покладаються на бази даних реаналізу. Проте ці дані потребують верифікації для кожного конкретного випадку, оскільки похибки в оцінці швидкості вітру в ряді досліджень перевищували 100 %.

У ході даного дослідження було сформовано базу даних строкових спостережень за швидкістю вітру на 70 МС України та відповідних до їх координат даних реаналізу MERRA-2 тривалістю 10 років. Для всіх пар часових рядів (середньодобових, середньомісячних, середньорічних) було розраховано коефіцієнти кореляції. Середні значення коефіцієнта кореляції були рівними для середньодобових та середньомісячних рядів (0,8), осереднене середньорічне значення коефіцієнта кореляції виявилось суттєво нижчим (0,59). Для подальших розрахунків було вирішено використовувати середньомісячні ряди даних.

Було проведено кластерний аналіз 70 вибраних МС на основі таких показників, як коефіцієнт кореляції та різниця

значень середньої швидкості вітру. В результаті аналізу було сформовано п'ять кластерів об'єктів та нанесено їх на карту розподілу швидкості вітру на висоті 10 м. Для кожного кластера було розраховано статистичні параметри швидкості вітру. В межах кожного кластера було вибрано одну типову МС (характеристики якої були б наближені до середніх по кластеру). Для п'яти типових МС було розраховано вітроенергетичний потенціал, КВНП ВЕУ та середньорічний виробіток електроенергії.

Аналіз отриманих результатів виявив, що:

- нижчим швидкостям вітру відповідають вищі значення відносної похибки;
- найвищі показники коефіцієнта кореляції між рядами швидкості вітру та найнижчі похибки розрахунків притаманні третьому та четвертому кластерам;
- МС, що належать до кластерів з найкращою кореляцією даних за показником швидкості вітру (третій і четвертий кластери), характерний в середньому нижчий градус закритості горизонту (затінення станції);
- для високогірних регіонів дані реаналізу є заниженими більш ніж вдвічі, відповідно, суттєво заниженими є і значення виробітку електроенергії та КВНП ВЕУ.
- аналіз діаграм розсіювання вимірної та змодельованої швидкостей вітру для п'яти МС, які, відповідно представляють п'ять кластерів, показав, що найтіснішим є зв'язок між реальними даними та даними реаналізу в третьому кластері ($R^2=0,8$);
- найнижче значення відносної похибки середньомісячних швидкостей вітру становить 13,8% (третій кластер) і йому відповідає відносна похибка 17,5% у значенні середньорічного виробітку електроенергії та значенні КВНП ВЕУ. Відносна похибка розрахунку вітроенергетичного потенціалу становить 23 %.

Отже, МС, що входять до третього кластера, демонструють найтісніший зв'язок між реальними та змодельованими даними та найнижчі похибки розрахунків, що пояснюється досить високими швидкостями вітру та низькими значеннями затіненості горизонту МС (до цього кластера також входять вісім АМСЦ, що обслуговують аеропорти).

Загалом отримані результати добре узгоджуються з опублікованими результатами для інших регіонів.

Використання даних реаналізу вбачається можливим для оцінки середньої швидкості вітру та вітроенергетичного потенціалу регіонів з плоским рельєфом та низькою рослинністю (чи для водних об'єктів), оскільки нерівності рельєфу, забудова та висока рослинність суттєво спотворюють вітрову картину. Проте використання даних реаналізу для розробки інвестиційних проєктів та прогнозування виробітку електроенергії ВЕС можливе лише після попереднього калібрування та верифікації для кожного конкретного випадку.

Стаття підготовлена в межах виконання науково-технічних робіт Національної академії наук України: НДР «Комплекс-Інтегро» (КПКВК 6541030) та українсько-шведського проєкту «Українські стійкі енергетичні системи» (Ukrainian Sustainable Energy Systems), фінансованого Шведським інститутом (SI – Svenska institutet)

ПОСИЛАННЯ

1. Руководство по климатологической практике. Изд. 2014 г. ВМО-№ 100. С. 82.
2. MCP [Електронний ресурс]. URL: <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/energy-modules/mcp/> (дата звернення: 19.09.2023).
3. Тучинський Б. Г., Петренко К. В., Іванченко І. В. Верифікація результатів розрахунків швидкості вітру методом реаналізу. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 15-16 травня 2019 р.). К.: Інтерсервіс, 2019. С. 444–449.
4. Петренко К. В., Іванченко І. В., Кармазін О. О. Застосування діаграми Вороного для оцінки якості інформаційного покриття території України джерелами даних про вітер. Матеріали XXIV міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», 18–19 травня 2023 року, Київ. С. 248–250.
5. Осадчий В. І., Скриник О. Я., Ошурок Д. О., Вітрові ресурси тернопільської області. - 2017 [Електронний ресурс]. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/162410/06-Osadchii.pdf?sequence=1> / (дата звернення: 19.09.2023).
6. Assessment of wind energy potential using reanalysis data: A comparison with mast measurements. Rajat Kanti Samal 2021 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262102151X> (дата звернення: 19.09.2023).
7. Calibration of Reanalysis Data against Wind Measurements for Energy Production Estimation of Building Integrated Savonius-Type Wind Turbine Andoni Gonzalez-Arceo, Maitane Zirion-Martinez de Musitu, Alain Ulazia, Mario del Rio, Oscar Garcia 2020 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/9017> (дата звернення: 19.09.2023).
8. What Can Reanalysis Data Tell Us About Wind Power? Stephen Rose and Jay Apt 2014 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.cmu.edu/ceic/assets/docs/publications/working-papers/ceic-14-05.pdf> (дата звернення: 19.09.2023).
9. Statistical methodology for on-site wind resource and power potential assessment under current and future climate conditions: a case study of Suriname. Peter Donk, Els Van Uytven, Patrick Willems 2019 [Електронний ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0885-6> (дата звернення: 19.09.2023).
10. POWER | Data Access Viewer Prediction Of Worldwide Energy Resource [Електронний ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата звернення: 19.09.2023).
11. NASA POWER| Docs [Електронний ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/sources/#meteorological> (дата звернення: 19.09.2023).
12. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) Електронний ресурс]. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/14/jcli-d-16-0758.1.xml#s2> (дата звернення: 19.09.2023).
13. WIND [Електронний ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/meteorology/wind/> (дата звернення: 19.09.2023).
14. Modeling of Ethiopian Wind Power Production Using ERA5 Reanalysis Data Kena Likassa Nefabas, Lennart Söder, Mengesha Mamo, Jon Olafsson 2021 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2573> (дата звернення: 19.09.2023).

15. Wind potentials for EU and neighbouring countries. Dalla Longa, F.; Kober, T. Badger, J.; Volker, P. Hoyer-Klick, C. Hidalgo Gonzalez, I.; Medarac, H.; Nijs, W.; Politis, S.; Tarvydas, D.; Zucker, A. 2018 [Електронний ресурс]. URL:https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109698/kjna29083enn_1.pdf (дата звернення: 19.09.2023).
16. Spatial and temporal variability characteristics of offshore wind energy in the United Kingdom Panit Potisomporn, Christopher R. Vogel 2021 [Електронний ресурс]. URL:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2685> (дата звернення: 19.09.2023).
17. An all-Africa dataset of energy model “supply regions” for solar photovoltaic and wind power Sebastian Sterl, Bilal Hussain, Asami Miketa, Yunshu Li, Bruno Merven, Mohammed Bassam Ben Ticha, Mohamed A. Eltahir Elabbas, Wim Thiery, Daniel Russo, 2022 [Електронний ресурс]. URL:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9622823/> (дата звернення: 19.09.2023).
18. Estimating wind speed and capacity factors in Mexico using reanalysis data C. F. Morales-Ruvalcaba, O. Rodriguez-Hernandez, O. Mart'inez-Alvarado, D.R. Drew, E. Ramos, 2020 [Електронний ресурс]. URL:<https://centaur.reading.ac.uk/92440/1/manuscript.pdf> (дата звернення: 19.09.2023).
19. On the wind resource in Algeria: Probability distributions evaluation. Houdayfa Ounis and Nawel Aries 2020 [Електронний ресурс]. URL:<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0957650920975883?icid=int.sj-abstract.citing-articles.2> (дата звернення: 19.09.2023).
20. UTILITY-SCALE SOLAR AND WIND AREAS. BURKINA FASO. Imen Gherboudj and Mohammed Sanusi Nababa 2021 [Електронний ресурс]. URL:https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Sep/IRENA_utility_solar_wind_Burkina_Faso_2021_EN.pdf?rev=79f0cfb860ca4cdf9ceadb894425d342 (дата звернення: 19.09.2023).
21. Energy Potential Assessments and Investment Opportunities for Wind Energy in Indonesia. Nurry Widya Hesty, Dian Galuh Cendrawati, Rabindra Nepal, Muhammad Indra al Irsyad, 2021 [Електронний ресурс]. URL: https://cama.crawford.anu.edu.au/sites/default/files/publication/cama_crawford_anu_edu_au/2021-03/31_2021_hesty_cendrawati_nepal_irsyad.pdf (дата звернення: 19.09.2023).
22. Understanding New Zealand's Wind Resources as a Route to 100% Renewable Electricity. Stephen Poletti and Iain Staffell, 2021 [Електронний ресурс]. URL:<https://cdn.auckland.ac.nz/assets/business/about/our-research/research-institutes-and-centres/energy-centre/Working%20papers/understanding-nz-wind-poletti.pdf> (дата звернення: 19.09.2023).
23. Analyzing Europe's Biggest Offshore Wind Farms: A Data Set with 40 Years of Hourly Wind Speeds and Electricity Production. Oliver Grothe, Fabian Kächele, Mira Watermeyer, 2022 [Електронний ресурс]. URL:<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000143595/148493630> (дата звернення: 19.09.2023).
24. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C. A., Darmenov A., Bosilovich M. G., Reichle R., et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). J. Clim. 2017, 30, 5419–5454.
25. Mamani, R.; Hendrick, P. Weather research & forecasting model and MERRA-2 data for wind energy evaluation at different altitudes in Bolivia. – Wind Eng. 2022, 46, 177–188.
26. Rabbani, R.; Zeeshan, M. Exploring the suitability of MERRA-2 reanalysis data for wind energy estimation, analysis of wind characteristics and energy potential assessment for selected sites in Pakistan. – Renew. Energy 2020, 154, 1240–1251.
27. Khatibi, A.; Krauter, S. Validation and performance of satellite meteorological dataset MERRA-2 for solar and wind applications. – Energies 2021, 14, 882.
28. Staffell, I.; Pfenninger, S. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. – Energy 2016, 114, 1224–1239.
29. Cowin E., Wang Ch., Walsh D. C. Assessing Predictions of Australian Offshore Wind Energy Resources from Reanalysis Datasets. – Energies 2023, 16(8), 3404; <https://doi.org/10.3390/en16083404>.
30. Вітроенергетика / За заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2023. С. 43–57.
31. Bosilovich, M. G., Lucchesi, R., & Suarez, M. (2015). MERRA-2: NASA GMAO Office Note 9, 73 p.
32. POWER Data Methodology. [Електронний ресурс]. URL: <http://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/> (дата звернення: 12.09.2023).
33. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир. 1989 г. 540 с.
34. PAST 4.03 STATISTICAL ANALYSIS APP FOR WINDOWS [Електронний ресурс]. URL:<https://past.en.lo4d.com/windows/> (дата звернення: 12.09.2023).
35. Кластерний аналіз [Електронний ресурс]. URL:https://pidru4niki.com/11800912/ekonomika/klasterniy_analiz / (дата звернення: 12.09.2023).

REFERENCES

1. Rukovodstvo po klymatolohycheskoi praktyke. Yzd. 2014 h. VMO-№ 100. S. 82.
2. MCP [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.emd-international.com/windpro/windpro-modules/energy-modules/mcp/> (data zvernennia: 19.09.2023).
3. Tuchynskiy B.H., Petrenko K.V., Ivanchenko I.V. Verryfikatsiia rezultativ rozrakhunkiv shvydkosti vitru metodom reanalizu // Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u XXI stolitti: materialy XX mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Kyiv, 15-16 travnia 2019 r.). K.: Interservis, 2019. S. 444–449.
4. Petrenko K. V., Ivanchenko I. V., Karmazin O. O. Zastosuvannia diahramy Voronoho dlia otsinky yakosti informatsiinoho pokryttia terytorii Ukrainy dzherelamy danykh pro viter. Materialy XKHIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Vidnovliuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist u KhKhI stolitti», 18–19 travnia 2023 roku, Kyiv. S. 248–250.
5. Osadchyi V. I., Skrynyk O. Ia., Oshurok D. O., Vitrovi resursy ternopil'skoi oblasti. - 2017 [Elektronnyi resurs]. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/162410/06-Osadchii.pdf?sequence=1> / (data zvernennia: 19.09.2023).
6. Assessment of wind energy potential using reanalysis data: A comparison with mast measurements. Rajat Kanti Samal 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262102151X> (data zvernennia: 19.09.2023).
7. Calibration of Reanalysis Data against Wind Measurements for Energy Production Estimation of Building Integrated Savonius-Type Wind Turbine Andoni Gonzalez-Arceo, Maitane

- Zirion-Martinez de Musitu, Alain Ulazia, Mario del Rio, Oscar Garcia 2020 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/9017> (data zvernennia: 19.09.2023).
8. What Can Reanalysis Data Tell Us About Wind Power? Stephen Rose and Jay Apt 2014 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.cmu.edu/ceic/assets/docs/publications/workin-g-papers/ceic-14-05.pdf> (data zvernennia: 19.09.2023).
 9. Statistical methodology for on-site wind resource and power potential assessment under current and future climate conditions: a case study of Suriname. Peter Donk, Els Van Uytven, Patrick Willems 2019 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0885-6> (data zvernennia: 19.09.2023).
 10. POWER | Data Access Viewer Prediction Of Worldwide Energy Resource [Elektronnyi resurs]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (data zvernennia: 19.09.2023).
 11. NASA POWER| Docs [Elektronnyi resurs]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/source/s/#meteorological> (data zvernennia: 19.09.2023).
 12. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) [Elektronnyi resurs]. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/30/14/jcli-d-16-0758.1.xml#s2> (data zvernennia: 19.09.2023).
 13. WIND [Elektronnyi resurs]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/meteorology/wind/> (data zvernennia: 19.09.2023).
 14. Modeling of Ethiopian Wind Power Production Using ERA5 Reanalysis Data Kena Likassa Nefabas, Lennart Söder, Mengesha Mamo, Jon Olsson 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2573> (data zvernennia: 19.09.2023).
 15. Wind potentials for EU and neighbouring countries. Dalla Longa, F.; Kober, T. Badger, J.; Volker, P. Hoyer-Klick, C. Hidalgo Gonzalez, I.; Medarac, H.; Nijs, W.; Politis, S.; Tarvydas, D.; Zucker, A. 2018 [Elektronnyi resurs]. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109698/kjna29083enn_1.pdf (data zvernennia: 19.09.2023).
 16. Spatial and temporal variability characteristics of offshore wind energy in the United Kingdom Panit Potisomporn, Christopher R. Vogel 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/we.2685> (data zvernennia: 19.09.2023).
 17. An all-Africa dataset of energy model “supply regions” for solar photovoltaic and wind power Sebastian Sterl, Bilal Hussain, Asami Miketa, Yunshu Li, Bruno Mervin, Mohammed Bassam Ben Ticha, Mohamed A. Eltahir Elabbas, Wim Thiery, Daniel Russo, 2022 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9622823/> (data zvernennia: 19.09.2023).
 18. Estimating wind speed and capacity factors in Mexico using reanalysis data C. F. Morales-Ruvalcaba, O. Rodriguez-Hernandez, O. Martínez-Alvarado, D.R. Drew, E. Ramos, 2020 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://centaur.reading.ac.uk/92440/1/manuscript.pdf> (data zvernennia: 19.09.2023).
 19. On the wind resource in Algeria: Probability distributions evaluation. Houdayfa Ounis and Nawel Aries 2020 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0957650920975883?icid=int.sj-abstract.citing-articles.2> (data zvernennia: 19.09.2023).
 20. UTILITY-SCALE SOLAR AND WIND AREAS. BURKINA FASO. Imen Gherboudj and Mohammed Sanusi Nababa 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Sep/IRENA_utility_solar_wind_Burkina_Faso_2021_EN.pdf?rev=79f0cfb860ca4cdf9ceadb894425d342 (data zvernennia: 19.09.2023).
 21. Energy Potential Assessments and Investment Opportunities for Wind Energy in Indonesia. Nurry Widya Hesty, Dian Galuh Cendrawati, Rabindra Nepal, Muhammad Indra al Irsyad, 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: https://cama.crawford.anu.edu.au/sites/default/files/publication/cama_crawford_anu_edu_au/2021-03/31_2021_hesty_cendrawati_nepal_irsyad.pdf (data zvernennia: 19.09.2023).
 22. Understanding New Zealand's Wind Resources as a Route to 100% Renewable Electricity. Stephen Poletti and Iain Staffell, 2021 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://cdn.auckland.ac.nz/assets/business/about/our-research/research-institutes-and-centres/energy-centre/Working%20papers/understanding-nz-wind-poletti.pdf> (data zvernennia: 19.09.2023).
 23. Analyzing Europe's Biggest Offshore Wind Farms: A Data Set with 40 Years of Hourly Wind Speeds and Electricity Production. Oliver Grothe, Fabian Kächele, Mira Watermeyer, 2022 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000143595/148493630> (data zvernennia: 19.09.2023).
 24. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). J. Clim. 2017, 30, 5419–5454.
 25. Mamani, R.; Hendrick, P. Weather research & forecasting model and MERRA-2 data for wind energy evaluation at different altitudes in Bolivia. Wind Eng. 2022, 46, 177–188.
 26. Rabbani, R.; Zeeshan, M. Exploring the suitability of MERRA-2 reanalysis data for wind energy estimation, analysis of wind characteristics and energy potential assessment for selected sites in Pakistan. Renew. Energy 2020, 154, 1240–1251.
 27. Khatibi, A.; Krauter, S. Validation and performance of satellite meteorological dataset MERRA-2 for solar and wind applications. Energies 2021, 14, 882.
 28. Staffell, I.; Pfenninger, S. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. Energy 2016, 114, 1224–1239.
 29. Cowin E., Wang Ch., Walsh D. C. Assessing Predictions of Australian Offshore Wind Energy Resources from Reanalysis Datasets. Energies 2023, 16(8), 3404; <https://doi.org/10.3390/en16083404>.
 30. Vitroenerhetyka / Za zah. red. S. O. Kudri. – Kyiv: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2023. P. 43–57.
 31. Bosilovich, M. G., Lucchesi, R., & Suarez, M. (2015). MERRA-2: NASA GMAO Office Note 9, 73 p.
 32. POWER Data Methodology. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/> (data zvernennia: 12.09.2023).
 33. Bendat Dzh., Pyrsol A. Prykladnoi analiz sluchainykh dannykh. M.: Myr, 1989 h. 540 s.
 34. PAST 4.03 STATISTICAL ANALYSIS APP FOR WINDOWS [Elektronnyi resurs]. URL: <https://past.en.lo4d.com/windows/> (data zvernennia: 12.09.2023).
 35. Klasterniy analiz [Elektronnyi resurs]. URL: https://pidru4niki.com/11800912/ekonomika/klasterniy_analiz/ (data zvernennia: 12.09.2023).